

바이오차(Biochar)를 이용한 농림업부문 기후변화 대응 적용사례

우 승 한 *

1. 머리글

오늘날 온실가스 발생량 증가로 인해 글로벌 평균 온도는 매년 증가하고 있고, 이에 따라 지구촌 곳곳에서 기후변화와 관련된 다양한 문제들이 야기되고 있어 농림업 분야에서도 기후변화 대응책이 시급하게 필요한 실정이다. 2006년 세계토양학회에서 바이오차(Biochar)의 탄소격리 가능성을 제시한 이래 수많은 연구와 현장적용이 실행되어 왔고, 산업으로서 시장 규모도 점차 확대되고 있다. 2018년 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 특별보고서에 바이오차가 처음으로 이산화탄소 제거기술의 하나로 포함되어 향후 더 많은 이목이 집중될 것으로 기대된다. 본 기고에서는 바이오차의 특징과 기후변화 원리, 그리고 해외의 적용사례를 간략하게 기술하고자 한다.

2. 바이오차의 특징

2.1. 바이오차의 유래와 재발견

1879년 아마존을 탐험하던 Herbert Smith는 원주민이 재배하던 사탕수수의 경이로운 성장률이 검은 흙(terra preta) 때문이라고 보고한 바 있다. 1966년 아마존 토양에 대해 최초로 과학적인 연구를 한 Wim Sombroek과 그 이후 Bruno Glaser 등의 연구에 의해 이 검은 흙이 오래전 원주민들이 넣었던 숯에 의한 것이고, 자연적이 아닌 인공적으로 조성

* 한밭대학교 화학생명공학과 교수(shwoo@hanbat.ac.kr).

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

된 것이라는 사실을 밝혀냈다<그림 1>. 아마존의 토양은 사실 농작물을 경작하기에는 매우 척박한 조건이었고 이를 개선하기 위해 숯을 넣었던 것이다(Marris 2006).

2006년에는 세계토양과학회에서 이 검은 흙을 탄소격리와 바이오에너지의 관점에서 재조명할 필요가 있다고 제안하고, 2007년 코넬대의 Lehmann 교수가 네이처에 탄소 네가티브 원리를 발표하였다(Lehmann 2007). 이때부터 바이오차라는 용어가 학계에 등장하기 시작했으며, 그 의미는 바이오매스와 차콜의 합성어로 바이오 숯으로 불리기도 한다. 2007년 코넬대의 Lehmann 교수가 네이처에 탄소 네가티브 원리를 발표한 이후로 기후변화와 관련하여 수많은 연구논문들이 발표되고 있다. <그림 2>에서 보는 바와 같이, SCOPUS 저널 데이터베이스에서 “biochar”를 키워드로 검색을 하면 2005년 1편이던 것이, 2020년에는 약 4000편으로 급격하게 증가하였다. 탄소격리의 중요성으로 인해 네이처와 사이언스 저널에도 지금까지 17편이 발표되었다. Transparency Market Research (2017)에 의하면, 전 세계 바이오차 시장 규모는 2026년 32억 달러 정도일 것으로 예측되고, 평균 성장률은 연간 14.5%인 것으로 전망되고 있다. 그중에서 북아메리카가 약 61%, 그다음으로 유럽, 아시아, 남아메리카 순으로 시장이 형성될 것으로 추정된다.

<그림 1> 아마존의 일반 토양과 테라 프레타 토양

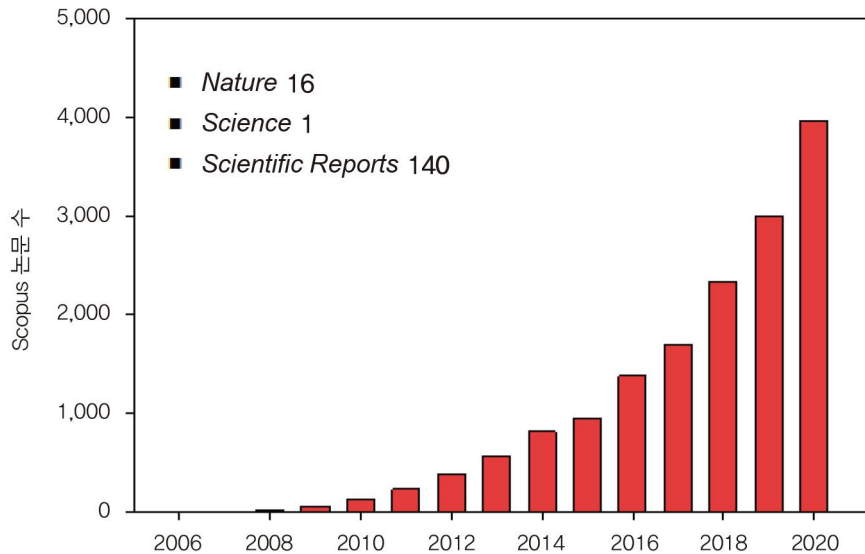


일반 토양

테라 프레타 토양

자료: Glaser and Birk(2012).

<그림 2> 바이오차 연구 논문 수 추이(2005-2020)



자료: Scopus 데이터베이스를 활용하여 저자 작성.

2.2. 바이오차의 제조와 물리화학적 특성

2.2.1. 바이오차의 제조

바이오매스를 산소가 없거나 매우 적은 환경에서 약 300-800℃로 열분해하면 기체, 액체, 고체가 생성되는데, 이때 생성되는 고형물을 바이오차라고 한다. 온도가 낮고 오랜 시간 열분해 하는 경우, 바이오차 수율¹⁾은 20-50% 정도이며, 온도가 높을수록 수율은 낮아지고 기체 또는 액체의 수율이 증가하게 된다. 바이오차의 성분은 탄소가 대부분이며, 산소, 수소, 무기물을 포함한다. 제조 장치가 기체를 적절히 분리하지 못하는 일체형일 경우에는 기체가 응축되어 낮은 분자량의 탄소화합물들이 바이오차와 함께 잔류할 수 있다. 이러한 경우 바이오차 수율 즉, 총량은 증가하나 바이오차의 탄소 품질(탄소 비율)은 감소하게 된다. 예를 들어 산소(O)/탄소(C) 비율이 증가하여 최종적으로 탄소저장 양은 각각의 경우에 따라 달라질 수 있다. 산소가 풍부한 환경에서 태우면 바이오매스는 이산화탄소로 연소되고 잔류물은 무기물이 대부분인 재가 되지만, 무산소 열분해 환경에서는 탄소가 고형물에 고정화

1) 원료 바이오매스 대비 생성되는 바이오차의 무게비율을 말함.

되어 잔류하게 된다. 바이오차 제조의 원료가 되는 바이오매스는 넓은 의미에서 축분과 슬러지를 포함하는 모든 유기물이 가능하며, 원료의 종류에 따라 바이오차의 특성이 확연하게 달라질 수 있다. <그림 3>에서는 농가에서 구할 수 있는 대표적인 왕겨, 벃짚, 우드칩으로 만든 바이오차의 사례를 볼 수 있다.

<그림 3> 바이오매스 원료와 이로부터 생산된 바이오차



2.2.2. 바이오차의 물리화학적 특성

바이오차는 생산 온도에 가장 큰 영향을 받는데, 온도가 낮을수록 낮은 탄소(C), 높은 산소(O)/탄소(C) 비율, 높은 수소(H)/탄소(C) 비율의 원소 함량 특성을 가진다. 이에 따라 높은 온도에서 만들어진 바이오차일수록 분해가 많이 되어 산소와 수소 함량이 줄어들고, 탄소의 함량이 증가한다. 즉, 안정성이 높아지고, 기공이 증가하고, 표면적이 증가한다. 따라서 높은 온도에서 생산된 바이오차일수록 탄소저장 효과가 높다고 할 수 있다. 그러나 생산되는 양이 줄어들기 때문에 종합적으로는 동일한 원료 바이오매스 양 대비 탄소저장 양은 줄어들 수도 있으며, 이는 각각의 경우에 따라 달라질 수 있다.

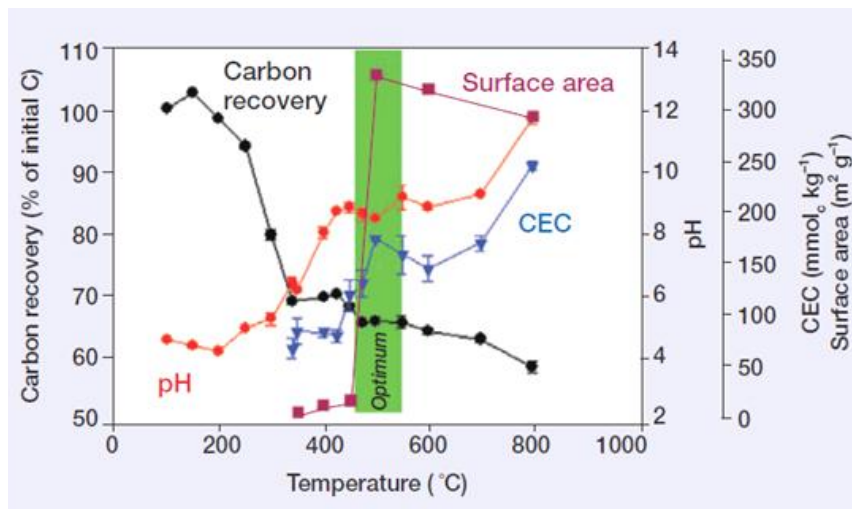
또한 생산 온도가 증가할수록 바이오차의 pH와 양이온 치환능(Cation Exchange Capacity, CEC)²⁾이 증가한다. 온도가 증가할수록 수율이 낮아져서 탄소 비율은 증가하고 무기물 비율이 증가하나 바이오매스 기준으로 잔존하는 탄소의 양 그 자체는 감소한다고

2) 토양의 잠재적 비옥도를 측정할 때 주로 사용됨.

볼 수 있다. <그림 4>에서 보는 바와 같이, 너무 낮은 온도에서 만들어진 바이오차는 열분해 되지 않은 유기물이 많아 토양에서 분해가 많이 일어나며, 단기적으로는 식물 성장에 도움을 주는 것으로 보일 수 있다.

바이오차가 토양 속에 있을 때는 공기 순환을 증가시키고, 식물의 뿌리가 통과하게 되고, 미생물의 거주지 역할을 하게 된다. 일반적으로 열분해를 하게 되면 원료 물질보다 입자의 크기는 줄어들게 된다. 그리고 압력을 증가시키면 입자들의 응집이 일어나 입자의 크기는 증가하고 고체의 양은 증가하는 것으로 알려지고 있다. 열분해가 진행되면 휘발성 물질이 빠져나가고 점점 더 흑연(graphite)의 결정성이 증가하게 되어 온도가 증가할수록 고체 밀도는 증가하게 된다. 그러나 기공 형성이 증가함에 따라 겉보기 밀도는 감소하게 된다. 기계적 강도는 고체 밀도와 밀접하게 관련되어 있어 열분해를 통해 생성된 바이오차는 원료 물질보다 약 20% 정도 기계적 강도가 증가하는 것으로 알려져 있다.

<그림 4> 바이오차 제조 온도에 따른 물리화학적 특성



자료: J. Lehmann, Front Ecol Environ(2007).

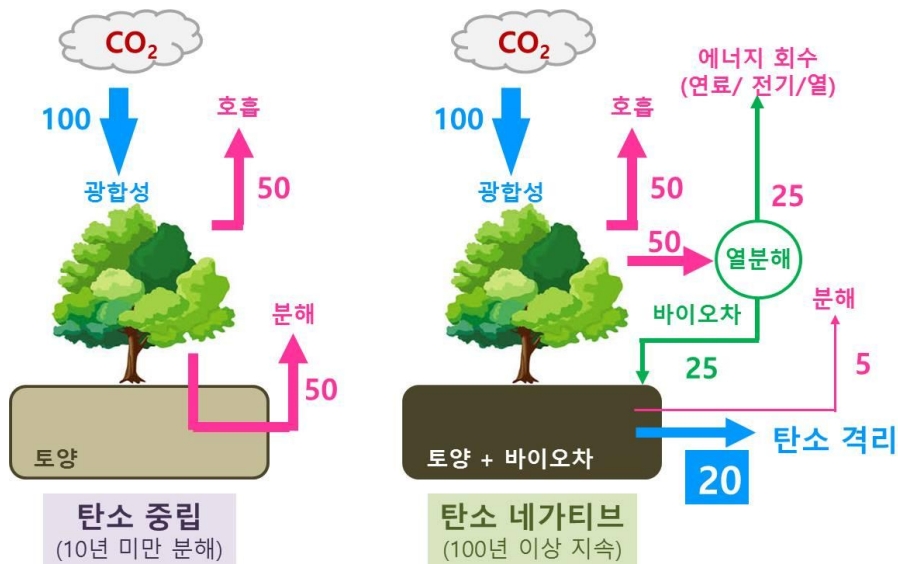
3. 기후변화와 바이오차

3.1. 바이오차의 기후변화 저감 원리

코넬대 리만 교수는 2007년 네이처 논문을 통해 바이오차의 탄소 네가티브 원리를 제안한 바 있다<그림 5>. 식물이 광합성에 의해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하면 약 50%는 호흡에 의해 대기 중으로 다시 방출되고 나머지는 식물의 성장을 통해 바이오매스에 고정화된다. 그러나 증가된 바이오매스는 결국 토양에 묻히면 미생물에 의해 약 10년의 짧은 기간 동안 모두 분해되어 결과적으로 초기에 식물에 의해 흡수되었던 이산화탄소가 모두 방출되므로 탄소중립이 된다. 그러나 바이오차의 경우에는 바이오매스에 저장되었던 이산화탄소가 열 분해를 통해 바이오차의 형태로 남게 되고 이는 토양에 들어가더라도 100년 이상 보존될 수 있다. 바이오차의 일부가 분해되더라도 장기간 저장되는 탄소는 초기에 흡수된 이산화탄소의 약 20% 정도가 되며, 이는 탄소 네가티브라고 볼 수 있다. 즉, 대기중의 자유 이산화탄소가 바이오매스를 거쳐 바이오차의 형태로 토양속에서 오랜 기간동안 안정성을 유지하며 저장되는 것이다.

물론 열분해를 통해 바이오차를 만드는 과정에서 외부에서 투입되는 에너지는 저장되는 에너지(탄소로부터 전환하여 계산한 에너지)보다 적어야 할 것이다. 일반적으로 바이오매스가 열분해되는 과정은 발열반응이기 때문에 초기에 점화하는데 필요한 에너지만 공급하면 전체적으로는 오히려 에너지를 회수할 수 있다. 이는 전기나 열, 연료의 형태로 바이오에너지를 어떻게 회수하는가가 전체 과정의 효율성을 결정하는 중요한 요인이 될 것이다. 즉, 적절한 바이오차 생산 공정을 적용하지 않으면 탄소 네가티브가 되지 않을 수 있다.

<그림 5> 바이오차의 기후변화 저감 원리



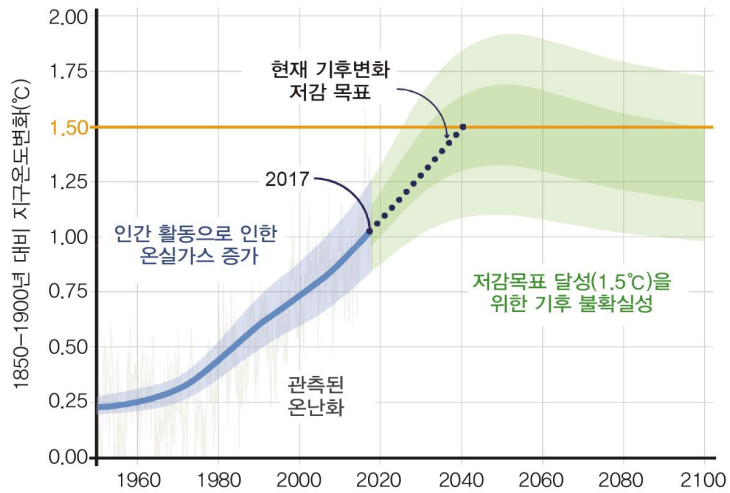
자료: J. Lehmann, Nature(2007), 그림을 재구성함 (우승한, 바이오차(2015), p.77).

3.2. IPCC 6차 보고서

3.2.1. 기후변화 저감 목표

기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서는 1988년 이후 2014년까지 5차례 걸쳐 발표되었고, 이는 유엔기후변화협약의 근거로 사용되고 있다. 가장 최근의 6차 보고서는 2022년에 승인될 것으로 예상되고 현재 검토 중인 보고서에 의하면, 그전까지는 2100년 저감 목표가 산업화 이전 온도보다 $2^{\circ}C$ 증가하는 수준으로 억제해야 한다던 것이 $1.5^{\circ}C$ 증가 수준으로 더 엄격해졌다(IPCC, 2018). 2017년 기준으로 이미 $1^{\circ}C$ 증가하였으니, $0.5^{\circ}C$ 의 여유밖에 없는 실정으로, 이러한 목표를 달성하기 위해서는 2050년까지 탄소배출을 마이너스로 억제해야만 가능한 것으로 예측되었다.

<그림 6> 산업화 이전 대비 지구온도 상승 추이



자료: IPCC Special Report(2018), p.82.

3.2.2. 기후변화 저감 옵션 및 이산화탄소 제거 기술

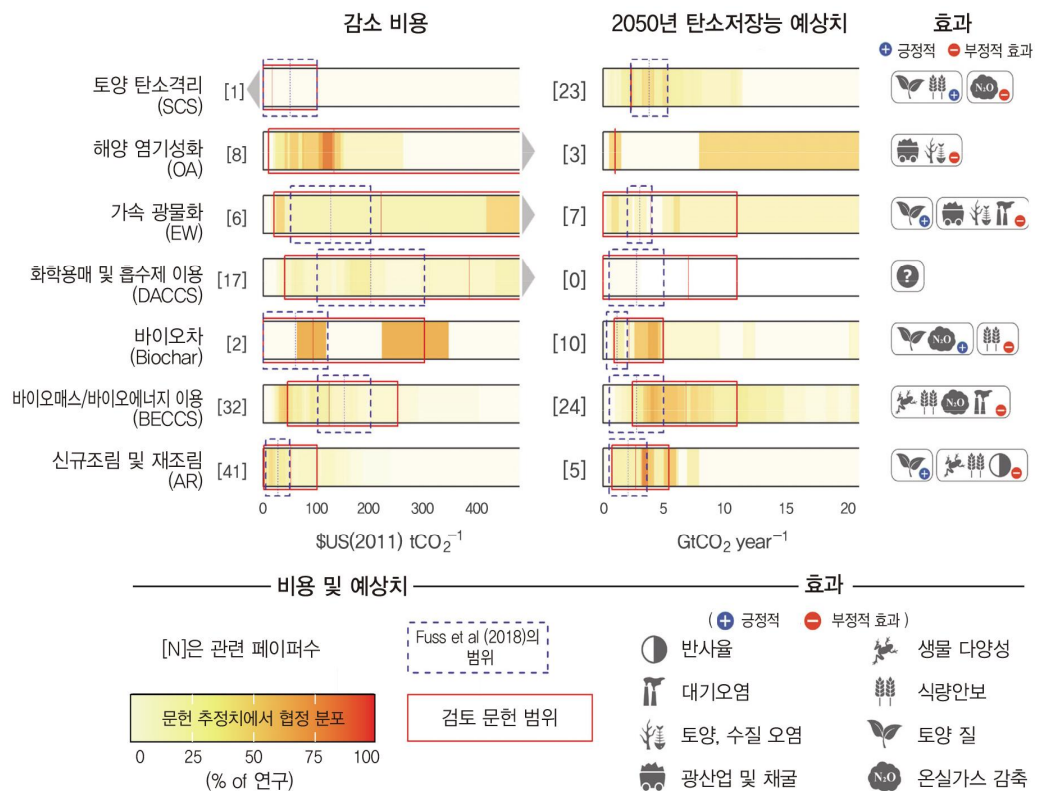
IPCC 6차 보고서에서는 1.5°C 목표 달성을 위해 기후변화 저감 옵션 몇 가지를 제시하고 있다. 분야별로는 1) 에너지 시스템 전환(바이오에너지, 풍력, 태양광, 원자력 등), 2) 토지/생태계 전환(식량생산 효율화, 음식물쓰레기 저감, 생태회복 등), 3) 도시/인프라 시스템 전환(도시계획, 전기차, 스마트그리드 등), 4) 산업 시스템 전환(에너지 효율화 등), 5) 이산화탄소 제거(Carbon Dioxide Removal, CDR) 등이 있다. 이 중에서 CDR 기술에는 5차 보고서 당시 신규조림 및 재조림(Afforestation and reforestation, AR), 바이오매스/바이오에너지 탄소저장 및 격리(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)만 제시되었던 것이 6차 보고서에는 바이오차, 토양 탄소격리(Soil Carbon Sequestration, SCS), 화학용매 및 흡수제를 이용한 탄소저장 및 격리(Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage, DACCS), 가속 광물화(Enhanced Weathering, EW), 해양 염기성화(Ocean Acidification, OA) 등의 기술이 추가되었다.

이와 같이 바이오차 기술은 5차 보고서 당시에는 확실한 탄소저장 기술로 인정받지 못했으나, 이번 6차 보고서에 새롭게 추가되어 바이오차를 통한 탄소저장이 인정받을 수 있는 길이 열렸다고 볼 수 있다. 여러 가지 CDR 기술을 비용과 탄소저장능 예상치로 비교한 결과, 바이오차는 비용이 저렴한 기술이지만, 탄소저장능도 다소 낮은 것으로 예측되었다.

<그림 7>. 그러나 이는 타 기술에 비해 적은 참고자료를 바탕으로 한 것이므로 변동성이 여전히 크고, 향후 더 많은 데이터가 축적되어야 할 것으로 보인다. 기타 효과로는 토양의 질이 좋아지고, 이산화탄소 이외의 온실가스 감축에 긍정적인 반면, 식량안보에는 부정적인 것으로 나와 있다. 여기서 식량안보는 바이오에너지 생산을 위해 바이오작물로 사용되었던 곡물(예: 옥수수)의 가격 변동성에 대한 우려와 유사한 것으로 추측된다.

바이오차의 탄소저장 예상치는 토양에 투입하여 100년 후 분해되지 않고 잔존하는 탄소의 양을 기준으로 한다. 이러한 바이오차의 100년 안정성에 대한 계량적 수치는 생산 온도에 따라 달라지는데, 600℃ 이상일 때는 89±13%, 450-600℃일 때는 80±11%, 350-450℃일 때는 65±15%인 것으로 IPCC에서는 제시하고 있으나, 생산 조건과 재료, 그리고 다양한 변수에 따라 달라질 수 있을 것이다.

<그림 7> CDR 기술의 비용과 2050년 탄소저장능 예상치 비교



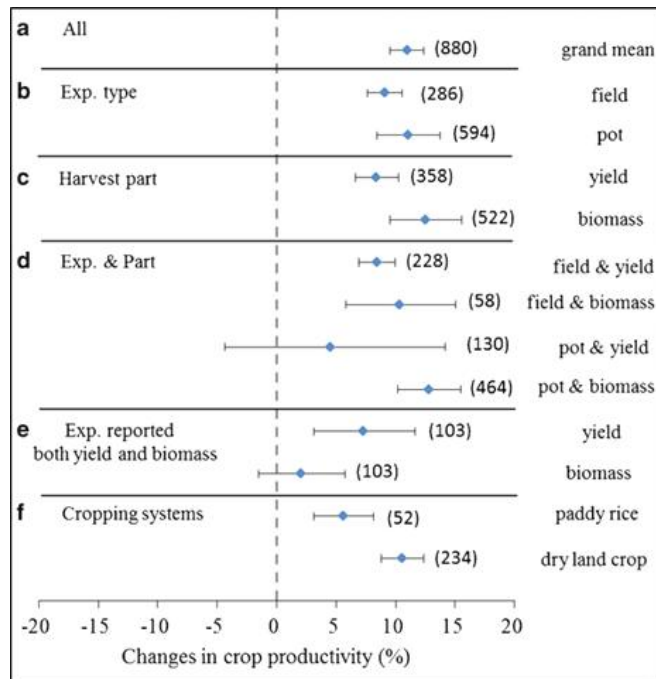
자료: IPCC Special Report(2018), p.344.

4. 바이오차의 농림업 적용사례

4.1. 농작물 적용 효과의 종합적 메타 분석

바이오차를 이용한 농작물 재배와 관련하여 수많은 연구가 이루어지고 있으며, 바이오매스 원료의 종류, 바이오차 생산 조건, 물리화학적 특성, 사용량 등 바이오차가 가지고 있는 변수뿐만 아니라, 적용 대상인 농작물의 종류, 토양의 종류, 날씨 등 재배 조건 등의 다양한 변수에 따라 그 결과도 다양하다. 2013년 Liu 등은 이러한 변수를 종합적으로 이해하기 위해 기존 논문을 조사하여 880건의 적용사례를 메타 분석하여 변수에 따른 작물 생산성을 비교 발표한 바 있다. <그림 8>에서 보는 바와 같이 바이오차를 적용함으로써 대조군에 비해 생산성이 감소하는 경우는 거의 없으며, 대부분 긍정정인 효과를 보였다. 평균적으로는 11% 증가하였고, 지상부 바이오매스는 12.5% 증가한 것으로 나타났다. 또한 바이오차의 적용은 산성 토양과 건조한 지역의 토양에 특히 효과적이었던 것으로 나타났다. 이는 바이오차가 대부분 알칼리성이고, 물을 보유하는 능력이 우수하여 반대 조건의 토양에 더욱 효과적인 것으로 이해할 수 있다. 최근에는 모든 경우를 다 포함하는 메타 분석보다는 비료첨가 효과, 질소 순환, 인 이용성, 메탄 발생 등 특정 주제에 대한 메타 분석 논문이 많이 보고되고 있다. 이와 같이 바이오차를 이용한 농작물의 재배에는 수많은 변수들이 영향을 준다는 점을 고려하면, 특정 조건에서 바이오차의 연구 결과로 그 효과를 단정짓기는 어려울 것이다. 그러나 이와 같이 방대한 연구논문의 메타 분석을 통해 전반적으로 긍정적인 결과를 얻었다는 사실로부터 바이오차의 작물재배에 대한 긍정적 효과는 일부 예외를 제외하고는 어느 정도 검증되었다고 볼 수 있을 것이다.

<그림 8> 메타 분석을 통한 농작물 생산성에 대한 바이오차의 영향



자료: Liu et al., Plant Soil (2013).

4.2. 일본 농가의 자발적 순환 프로세스

일본의 교토 카메오카시에서는 2008년부터 도시와 농촌이 상생하기 위한 쿨베지(COOL VEGE) 프로젝트를 시행한 바 있다. 이 프로젝트에는 일본 산림청, 일본 바이오차 협회, 카메오카 시, 리즈메이칸 대학, 가쿠엔 대학, 류고쿠 대학, 그리고 교토은행 등 여러 기업체와 지역 위원회 등이 참여하였다. 도시 인근의 농촌 지역에서 바이오매스 자원을 이용하여 바이오차를 만들고, 이를 농민의 채소 재배에 이용하여 생산한 채소를 “쿨베지”라는 이름으로 도시에 판매하는 구조로 되어 있다. 지자체에서는 탄소인증 위원회를 구성하여 해당 바이오차와 채소에 대한 탄소인증을 발급한다. 기업은 탄소인증을 구매하여 재정적으로 후원하고, 이를 상품에 표기함으로써 친환경적 이미지 제고의 장점이 있다. 은행에서는 탄소인증 라벨의 거래를 위해 공인된 펀드를 운영하는 역할을 담당하는 등 자발적 순환이 가능하도록 돕고 있다. 바이오차는 대나무를 원료로 만들고, 퇴비에 3분의 1 정도로 혼합하여 농지 1m²당 1kg 정도 투입한다. 첫 해에 바이오차 750kg을 사용하였는데, 2012년에는

33톤 정도로 증가하였다. 이렇게 생산된 채소는 2013년에 실제 판매를 통해 약 1억 원의 수익을 발생시켰고, 탄소인증 라벨은 후원기업이 라벨 당 20엔에 구매하여 그 중 50%를 농민에게 돌려주는 방식으로 운영하였다. 그 결과 농민은 약 5-10%의 추가 수익을 올릴 수 있게 되었다고 한다.

<그림 9> 일본 카메오카 교토 쿨베지 프로젝트



자료: 쿨베지 프로젝트(<https://coolvege.com/>) (2021).

4.3. 독일 베를린 식물원 적용사례

독일 베를린의 달렘 식물원은 43헥타르 규모의 면적에 22,000여 종류의 식물종이 자라는 곳이다. 이 방대한 지역에서는 낙엽, 나뭇가지, 잡초 등 1년에 약 2,000m³의 식물 부산물이 발생하고, 식물 관리를 위해 퇴비 약 180m³, 이탄 성분의 영양제 약 70m³이 소요되고 있다. 베를린 자유대학의 와그너 교수 등은 이를 개선하기 위해 테라 보가 프로젝트를 실시했는데, 이는 식물 부산물을 적절하게 활용하고 토양의 탄소와 영양분의 손실을 줄여 식물원과 같이 닫힌 시스템에서 자원 순환을 효율적으로 하면서 동시에 영양제와 퇴비 구입 비용의 절감을 목표로 하고 있다. 전체 과정은 1) 식물 부산물의 수집 및 파쇄, 2) 바이오차 생산, 3) 바이오차 15%를 식물 부산물과 혼합, 4) 퇴비화, 5) 부식화, 6) 10mm 이하의 체거름으로 되어 있다. 바이오차 제조 시설은 시간 당 원료 40kg을 처리할 수 있는 용량이고, 열분해 장치의

길이와 높이는 각각 2.5m와 1m 정도이다. 퇴비화에 바이오차를 적용한 경우 악취 발생이 줄어들고, 최종 퇴비의 형상에서 더 유리한 결과를 얻었다고 한다. 그리고 최종 바이오차가 적용된 퇴비는 물 보유량, 총 유기물 함량, 총 탄소, 총 질소 함량이 증가하였다. 이렇게 만든 퇴비를 배추, 파파야, 아라비카 커피 재배를 위한 화분 실험을 수행한 결과 식물 성장에는 다양한 결과가 나왔지만, 뿌리의 발달에 좋은 영향과, 곰팡이 병충해 발생이 줄어드는 결과를 얻었다.

<그림 10> 독일 베를린 식물원의 바이오차 생산 및 퇴비화 과정



자료: 테라보가 프로젝트(<https://terraboga.de/>) (2021).

4.4. 미국 록키산맥 재건 BANR 프로젝트

미국 록키산맥은 1990년대 중반부터 병충해로 인해 수많은 소나무와 가문비나무가 병들어 죽게 되었는데, 피해 넓이가 1,700만 헥타르에 달하고 이는 우리나라 전체 숲 면적의 2.7배에 달하는 규모이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 “지속가능 록키 바이오에너지 네트워크(The Sustainable Bioenergy Alliance Network of the Rockies, BANR)”에서는 2013년 미국 농무부, 국립농업식품연구소, 산림연구소, 미국 에너지부 국가재생에너지연구소,

록키산맥 연구센터, 콜로라도 대학, 와이오밍 대학, 몬타나 대학, 몬타나 주립대학, 아이다호 대학, 기업으로는 쿨플래닛 등이 참여하는 약 120억 원 규모의 프로젝트를 출범시켰다. 이 프로젝트는 죽은 나무의 제거, 바이오연료 생산, 쾌적한 환경의 유지, 일자리 창출, 지역 사회 교육 등을 목표로 하고 있다.

주요 연구 분야는 아래와 같이 5개 분야로 구성되어 있다.

- 1) 원료 공급: 자료 수집, 원격 센서, 지질공간층 분석, 디지털 원료 지도 작성, 미래 병충해 감염 예측 및 예방
- 2) 원료의 물류 및 가공: 바이오매스 확보를 위한 비용/생산 모델 개발, 기업 참여 수확/수송/가공/전처리 연구, 원료의 품질 가이드라인 확립
- 3) 통합 성능 및 지속가능성: 생태계 영향 연구, 바이오차 활용 평가, 탄소/온실가스 모델링/전과정 평가, 경제성 평가, 사회경제성 및 정책 분석, 웹기반 의사결정 지원 도구 개발
- 4) 교육 프로그램: 중고등/대학/대학원 교육, 교사/교수 프로그램 개발, 다학제적 교육훈련과정 개발, 에너지/기후/환경 교육 프로그램 개발
- 5) 확산, 봉사, 건강, 안전: 워크샵/커뮤니티 모임, 이해관계자 참여, 건강/안전 표준화 및 교육

<그림 11> 록키산맥 병충해 피해 및 바이오차 원료 생산 과정



자료: BANR 프로젝트 (<https://banr.colostate.educoolvege.com/>) (2021).

5. 맺음말

바이오차는 수 천년 전부터 인류의 선조들이 토양을 개량하여 농작물을 효율적으로 생산하기 위해 오랫동안 사용해 왔다. 그러나 최근 바이오차의 탄소 저장 원리를 발견하게 되었고 이를 적절하게 활용할 경우에 기후변화에 대응할 중요한 수단이 될 수 있다는 것을 알게 되었다. 점차 바이오차를 이산화탄소를 제거하는 실질적인 방법으로 전 세계적인 제도화와 노력이 진행되고 있고, 수많은 연구가 수행되고, 시장이 형성되고 있다. 그러나 바이오매스를 수집하고, 바이오차를 생산하고, 농림업에 적용하는 여러 단계에 있어 오히려 부적절하게 진행될 경우 탄소 배출량이 더 증가할 수도 있다. 따라서 바이오차의 효과는 이러한 여러 단계의 공정을 적절하게 조합하고 각 단위 공정을 얼마나 에너지 효율적으로 적용하는가에 달려 있을 것이다. 국내에서도 필요한 제도가 적절하게 수립되어 바이오차 산업과 활용에 효과적으로 지원된다면 바이오차의 활용이 기후변화 대응에 효과적인 수단으로 자리잡을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- 우승한, 2015. *기후변화에 대응할 새로운 물결: 바이오차*. 좋은땅출판사
- Glaser, B. and Birk, J.J. 2012. *State of the Scientific Knowledge on Properties and Genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia*. Geochim. Cosmochim. Ac. 82. 39–51.
- IPCC Special Report 2018. *Global Warming of 1.5°C*
- Lehmann, J. 2007. *A Handful of Carbon*. Nature. 447. 143–144.
- Lehmann, J. 2007. *Bio-energy in the black*. Front. Ecol. Environ. 5(7). 381–387.
- Liu, X. et. al. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions— a meta-analysis of literature data. Plant Soil. 373. 583–594.
- Marris, E. 2006. Black is the New Green. Nature. 442, 624–626.

참고사이트

- Transparancy Market Research (<https://www.transparencymarketresearch.com/>) (검색일: 2021.02.21.)
- 기후변화에 관한 정부간 협의체 (<https://www.ipcc.ch/>) (검색일: 2021.02.21.)
- 일본 쿨베지 프로젝트 (<https://coolvege.com/>) (검색일: 2021.02.21.)
- 록키산맥 BANR 프로젝트 (<http://banr.colostate.edu>) (검색일: 2021.02.21.)
- 독일 베를린 식물원 테라보가 프로젝트 (<http://terraboga.de>) (검색일: 2021.02.21.)